

ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO DE LOS TEMPORALES MARÍTIMOS EN LA CORNISA ATLÁNTICA DURANTE EL INVIERNO 2013-14

Melisa MENÉNDEZ, Antonio ESPEJO, Jorge PÉREZ,
Fernando J. MENDEZ, Iñigo J. LOSADA

Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria". Universidad de Cantabria, España

menendezm@unican.es, perezgj@unican.es, espejoa@unican.es, mendezf@unican.es, losadai@unican.es

RESUMEN

Durante los meses del invierno de 2013-14, una serie de temporales marítimos alcanzaron las costas de la cornisa atlántica en el sur de Europa. El impacto de estos oleajes sobre distintos elementos de la costa (playas, puertos, etc.) provocó importantes daños estructurales, inundaciones y grandes erosiones en el litoral. El presente trabajo tiene como objetivo describir las dinámicas de estos temporales marítimos, caracterizando tanto el oleaje de forma multivariada como las situaciones atmosféricas que provocaron su génesis para, finalmente, investigar la singularidad de estos eventos en el sistema climático.

Para ello, se ha realizado una reconstrucción del oleaje con alta resolución en toda la cuenca oceánica del Atlántico Norte mediante un modelo de oleaje forzado con campos de viento en superficie procedentes de un reanálisis atmosférico. Los resultados se han validado con medidas instrumentales y utilizado para caracterizar el clima marítimo durante el invierno 2013-14. Esta información se ha complementado con un análisis de tipos de circulación (climatología sinóptica), con el cual se facilita la identificación de aquellos estados de la atmósfera responsables de la generación de oleajes extremos. Los resultados de este estudio identifican ciertos tipos de tiempo asociados a las situaciones de temporal marítimo durante el invierno 2013-14. La principal conclusión que se obtiene es que, aunque el número de temporales intensos ocurridos es inusual, su génesis y magnitud es similar a la del clima marítimo existente.

Palabras clave: Oleaje, eventos extremos, tormentas, temporal marítimo, patrones de circulación, altura de ola significativa.

ABSTRACT

During the winter months of 2013-14, a number of wind-sea storms reached the Atlantic coast in Europe. The impact of these wind-sea storms caused major structural damage, floodings and heavy erosion on the coast. This paper aims to describe the dynamics of these marine storms, characterizing both the multivariate wave climate as atmospheric conditions that caused its genesis to finally investigate the singularity of these events in the climate system.

A historical reconstruction of the wave climate at high spatial resolution over the North Atlantic ocean basin by a wave model forced with surface wind fields from an atmospheric reanalysis is developed. The wave outcomes have been validated with instrumental measurements and used to characterize the wave climate during the winter 2013-14. This information has been supplemented by an analysis of weather types, which provides an identification of those states of the atmosphere responsible for the generation of extreme waves. This study concludes that the high occurrence of intense winter wind-sea storms is unusual, whilst the wave storms have been generated from similar past atmospheric patterns.

Keywords: Wave, extreme event, wind-storm, weather type, significant wave height.

1. INTRODUCCIÓN

Las definiciones principales que describen un temporal marítimo suelen estar asociadas a un umbral de la intensidad de la velocidad del viento o a la magnitud de los daños sobre la franja litoral. En este trabajo se considera que un temporal marítimo es un evento natural de origen mete-oceanográfico asociado a episodios de oleaje extremos. En particular, los eventos extremos de oleaje se generan por la acción de episodios de viento intenso sobre un área extensa de la superficie del mar. Los campos de viento en superficie son la consecuencia de situaciones meteorológicas asociadas a ciertas formaciones, como borrascas y anticiclones, dinámicas atmosféricas que están controladas por los flujos de calor en la atmósfera que, a su vez, están alimentados por forzamientos astronómicos y su iteración con el océano, litosfera y criosfera.

Los temporales marítimos en la costa atlántica se caracterizan por alcanzar intensas magnitudes y ocurrir con frecuencia con respecto a otras costas del mundo. Además presentan una fuerte estacionalidad con máximos en invierno y una importante variabilidad inter-anual (Izaguirre et al., 2011). No obstante, durante los meses de diciembre a marzo del invierno 2013-14 una serie de temporales marítimos alcanzaron las costas atlánticas de Europa provocando importantes daños estructurales, inundaciones, grandes erosiones en el litoral y el paro de las actividades pesqueras. El objetivo de este trabajo es la caracterización de estos temporales y su estudio en un marco climático.

El trabajo está organizado en cinco secciones, siendo la primera esta introducción. En la sección 2 se describen las bases de datos atmosféricas y de oleaje utilizadas. En la sección 3 se describen los episodios de oleaje extremo que sucedieron durante el invierno 2013-14. La sección 4 resume el estudio climatológico sobre estos temporales, mediante comparación con la información del clima marítimo desde la década de los 80 y un análisis de patrones tipo de la circulación atmosférica asociados a temporales. Finalmente, en la sección 5 se describen las principales conclusiones obtenidas.

2. BASES DE DATOS UTILIZADAS

2.1 Variables atmosféricas.

La formación y posterior propagación del oleaje sobre la superficie del mar está totalmente condicionada por los campos de viento en superficie que, a su vez, están determinados por los sistemas de circulación atmosféricos. En este trabajo se han analizado los campos de presión a nivel del mar y los vientos procedentes del reanálisis global CFSR (Climate Forecast System Reanalysis. Saha et al. 2010) durante el periodo 1979-2014. Este reanálisis se genera mediante simulación numérica, empleando modelos similares a los que se usan para predicción meteorológica, y un proceso de asimilación de datos observados. La asimilación de datos incluye mediciones tomadas en superficie y en altitud a lo largo de toda la superficie terrestre así como medidas de observaciones en buques y procedentes de satélite.

2.2 Bases de datos de oleaje.

El principal objetivo de este trabajo es el estudio de los eventos de oleaje extremo o temporales marítimos. Por ello, uno de los principales esfuerzos realizados consiste en la reconstrucción histórica del oleaje sobre las costas atlánticas europeas y, en especial, la cornisa cantábrica y gallega. Cabe mencionar que el oleaje de temporal está constituido

mayoritariamente por oleaje tipo *swell* o mar de fondo (oleaje creado por la incidencia del viento sobre un área oceánica lejana). Por ello, para la correcta reproducción del oleaje por temporal es necesaria la simulación sobre toda la cuenca oceánica del Atlántico norte.

Para la simulación dinámica se ha utilizado el modelo WavewatchIII en su última versión (Tolman et al., 2014). El dominio espacial utilizado cubre las longitudes 82°O-10°E y las latitudes 25-73°N, con una resolución de 1/4°. Se ha utilizado la información batimétrica procedente de ETOPO2 (2-minute Gridded Global Relief Data. U.S. Department of Commerce, NOAA), y la cobertura de hielo y campos de viento procedentes del reanálisis CFSR. La base de datos resultante se ha denominado GOW-ATLN.

Una de las tareas elementales en toda reconstrucción histórica simulada es su validación con medidas instrumentales, lo que permite considerar la base de datos como observaciones cuasi-reales. En este trabajo se ha realizado una comparación con medidas procedentes de las boyas de la red exterior de Puertos del Estado: Bilbao, Cabo Peñas, Estaca de Bares, Silleiro y Villano-Sisargas. Los resultados de esta validación (figura 1) indican la buena calidad del reanálisis de oleaje para reproducir tanto los valores medios como máximos, así como una excelente reconstrucción temporal acorde a los datos medidos.

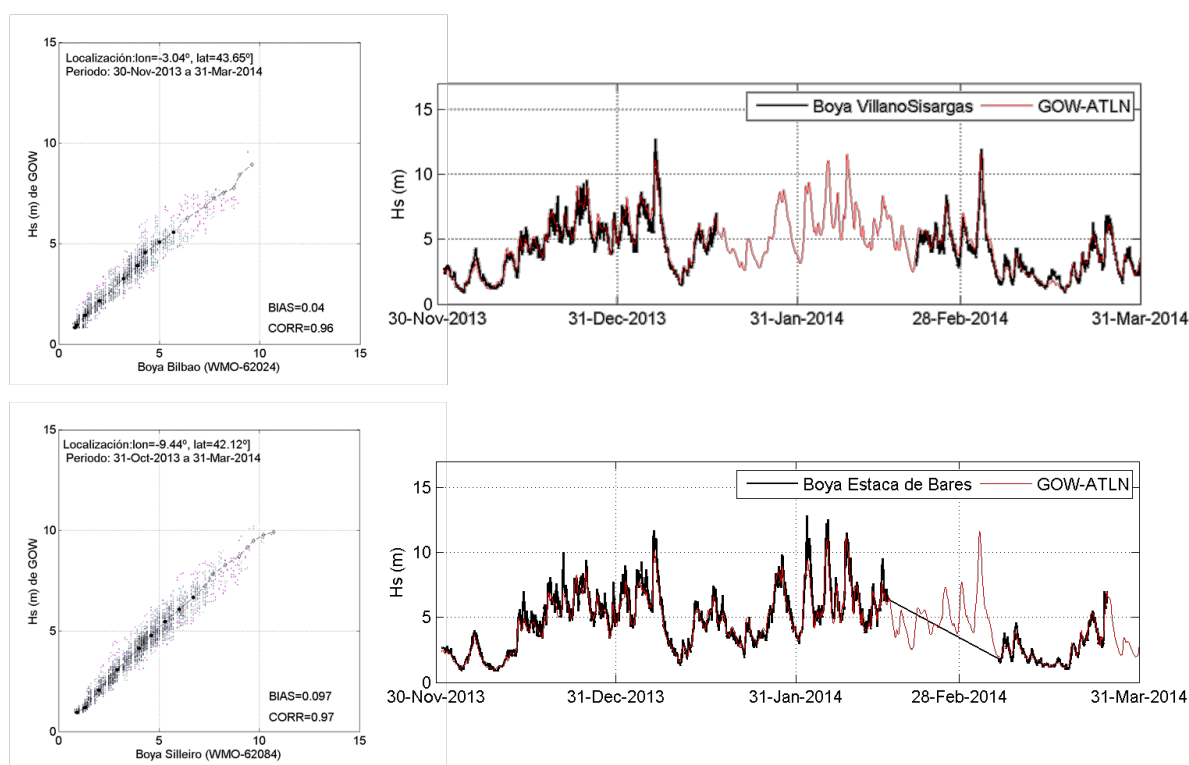


Fig. 1: Comparativa de la altura de ola significativa (H_s) entre los valores simulados (GOW-ATLN) y las medidas procedentes de boyas mediante: (panel izquierdo) diagramas de dispersión y (panel derecho) series temporales.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS TEMPORALES MARÍTIMOS DURANTE EL INVIERNO 2013-14.

Los temporales marítimos ocurridos durante el invierno 2013-14 que alcanzaron las costas españolas sucedieron entre el 20 de Diciembre y el 5 de Marzo del 2014. La peculiaridad más evidente que se observa es el número de temporales marítimos consecutivos ocurridos durante este periodo. En particular, se han detectado 8 eventos independientes que generaron oleajes

muy intensos a lo largo de la cornisa cantábrica y costa gallega. Las series temporales para diversos puntos a lo largo de la cornisa cantábrica y Galicia y los máximos de H_s asociados a eventos meteorológicos independientes se muestran en la figura 2. A continuación se describen brevemente las principales características de estos temporales marítimos:

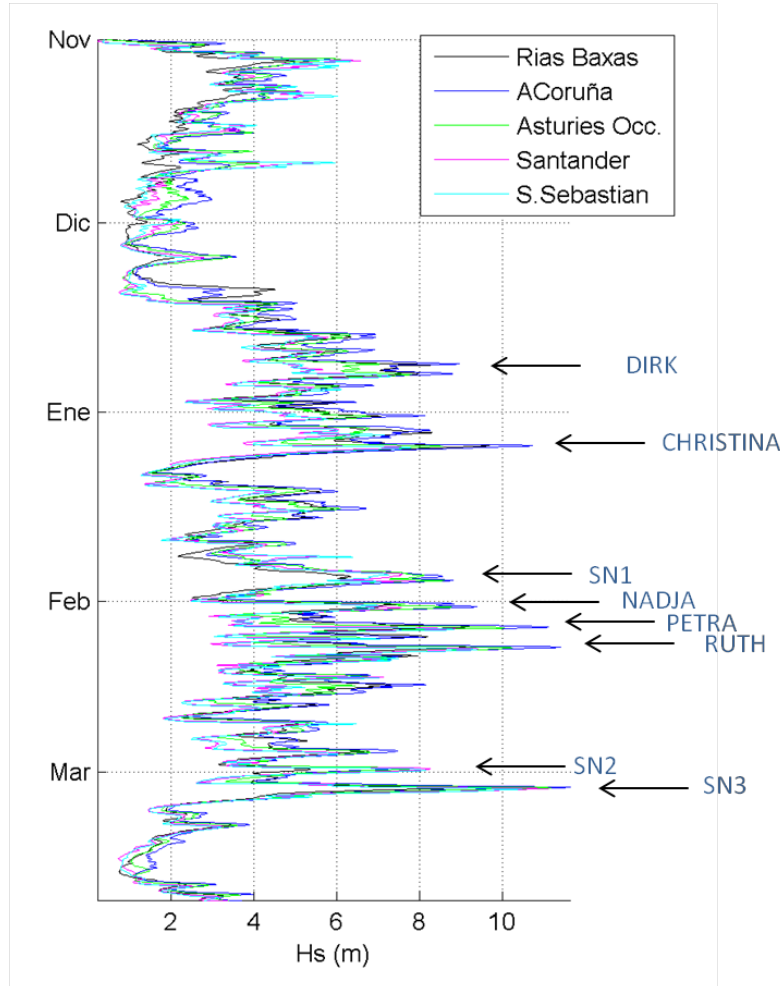


Fig. 2: Series de altura de ola significativa (H_s) en diversas localizaciones. Se remarcen los picos de los temporales asociados a distintas tormentas.

1-. Temporal Dirk.

Entre el 20 y el 23 de diciembre de 2013 domina la baja islandesa en el Atlántico norte. Este hecho genera un sistema de circulación de vientos que propicia la generación de oleajes de mar de fondo próximos a Groenlandia. Sin embargo, a lo largo del día 23, se constituye una depresión isobárica sobre el atlántico norte (ciclón extra-tropical Dirk). Ayudado por la especial intensidad de la corriente de Chorro en este periodo, se traslada y adquiere intensidad de forma explosiva al NO de Islandia. Los campos de viento resultantes generan oleajes bien desarrollados que viajan dirección SE hacia la cornisa atlántica europea y fuertes vientos a lo largo del litoral nor-occidental de España (se miden más de 150 Km/h en la costa Gallega). Los vientos del tercer cuadrante generan un máximo de oleaje sobre Galicia y Asturias (23-Dic). Al desplazarse el ciclón sobre las islas británicas, los campos de viento rolan a una componente más Oeste. Consecuentemente, el 26-Dic oleajes intensos alcanzan por primera vez todos el litoral norte español, con alturas de ola significativa (H_s) de más de 7m en el Golfo Vizcaya y mayor a 8m en Galicia y Asturias.

2-. Temporal Christina.

Sobre una situación de oleaje relativamente energética como consecuencia del ciclón Anne (borrasca al NW de Irlanda durante el periodo 1-6 de Enero), la borrasca Christina se intensifica al desplazarse por el atlántico Norte desde Canadá, lo que genera un oleaje muy intenso que se desplaza hacia Europa, especialmente la costa noroccidental ibérica. Se alcanzan máximos históricos de altura del oleaje en Galicia. Es especialmente relevante la magnitud de los periodos medios y de pico del oleaje, mayores a 15 y 20s respectivamente. Este temporal coincidió con mareas vivas y causó graves daños en Asturias y Galicia.

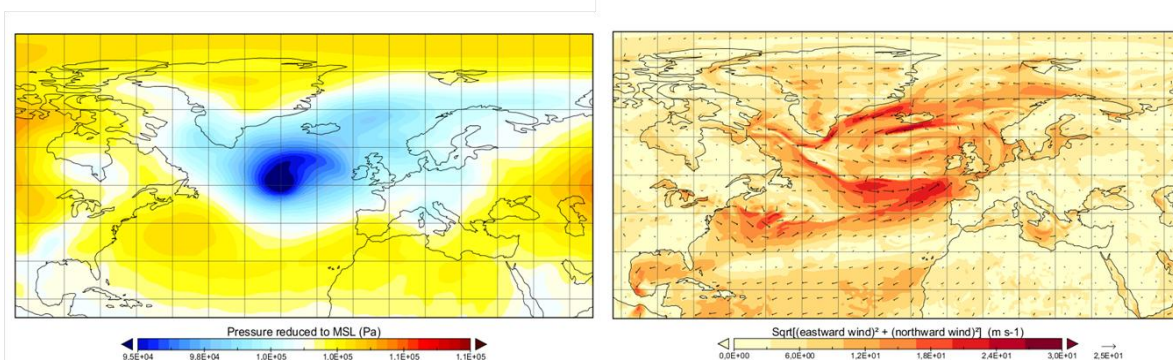


Fig. 3: Tormenta Christina en el centro del Atlántico (izqda) y los vientos en superficie correspondientes (drcha) durante el 5-Ene-2014 a las 09:00.

3-. Temporal SN1.

El 25-Ene. se produce una intensificación de la baja polar, lo que da lugar a una depresión bien definida en el NW Irlanda (SN: sin nombre) durante los días 26-28 Febrero. Como resultado se superan de nuevo los 7m de *Hs* en toda la cornisa cantábrica.

4-. Temporal Nadja.

El temporal marítimo que alcanza las costas atlánticas se produce por causa de los fuertes vientos en superficie de componente SE sobre el Atlántico occidental debido a la borrasca Nadja, situada sobre el Norte de Irlanda. El temporal de oleaje que alcanza la cornisa cantábrica presenta 2 picos de intensidad con medio día de desfase entre ellos debido a una perturbación del alta subtropical en el centro de la cuenca oceánica. Este temporal coincide con mareas vivas y causa graves daños en Reino Unido y la cornisa cantábrica.

5-. Temporal Petra.

Durante el 4-5 Feb., se forma un sistema ciclónico formado por dos centros de baja presión en superficie sobre el océano. Una de estas depresiones (Petra) se traslada al sur de Irlanda, generando vientos muy fuertes que provocan oleajes intensos en toda la cornisa atlántica europea.

6-. Temporal Ruth.

La tormenta Ruth, presenta una génesis explosiva muy similar al ciclón Petra. Del 7 al 9 de Febrero se desplaza por el océano hacia Irlanda provocando oleajes incluso más intensos en la cornisa cantábrica que los generados por el temporal Petra.

7-. Temporal SN2.

La situación de la alta subtropical y la baja polar genera fuertes vientos sobre la cuenca oceánica del atlántico de componente NO que provocan un fuerte oleaje en el Cantábrico,

especialmente sobre Cantabria y País Vasco dónde inusualmente se alcanzan alturas de ola mayores que en Galicia y Asturias (figura 4).

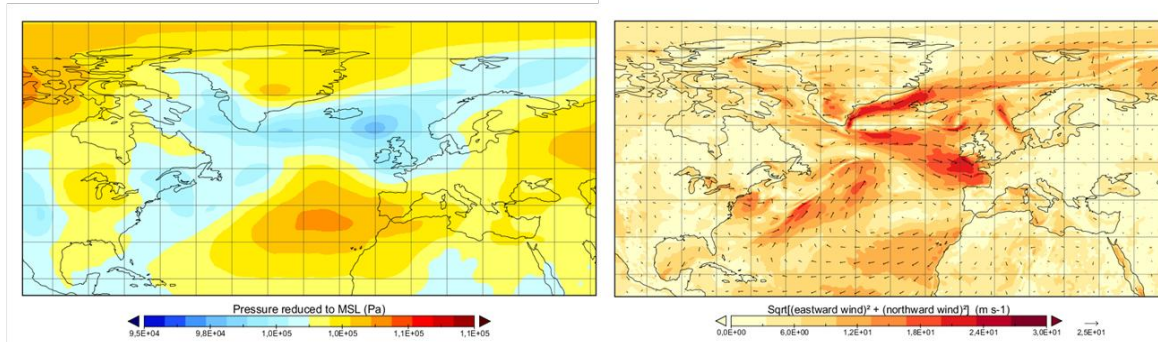


Fig. 4: Campos de presiones (izqda) y vientos en superficie (drcha) durante el 28-Feb-2014 a las 00:00.

8-. Temporal SN3.

El dipolo entre la baja polar y el alta subtropical se encuentra bien definido pero girado hacia el este. Este hecho compone una depresión sobre Irlanda y un corredor atlántico con dirección SE que provoca constantes e intensos vientos desde Groenlandia concentrando la direcciones de propagación del oleaje hacia la cornisa cantábrica durante los días 2 y 3 de Marzo. Durante el 3 y 4 de Marzo los campos de vientos sobre la superficie del océano se intensifican en la región del Mar Cantábrico lo que añade energía al oleaje que alcanza el Mar Cantábrico y provoca los máximos de altura del oleaje durante todo el invierno. Este temporal coincide con mareas vivas y causa graves daños en la cornisa cantábrica.

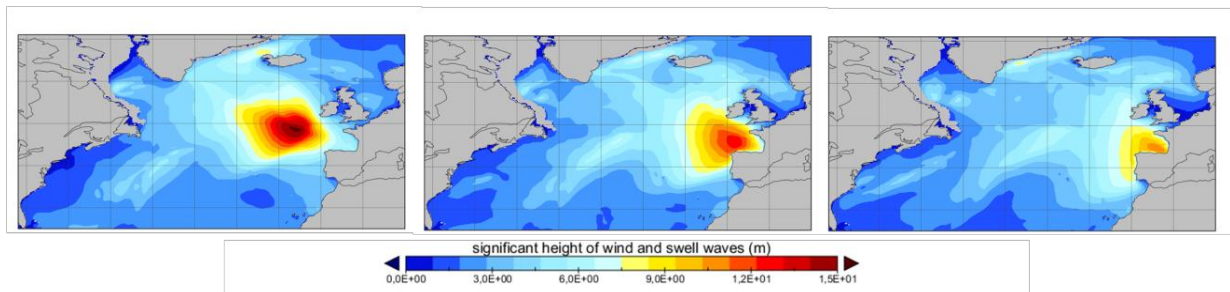


Fig. 4: Campos de altura de ola significativa durante el temporal SN3. Las imágenes corresponden con las fechas 3-Marzo a las 00:00, 12:00 y 21:00, de izquierda a derecha respectivamente.

4. ANÁLISIS CLIMÁTICO

El oleaje que alcanza las costas atlánticas europeas es altamente energético durante todo el año. Además, presenta una alta variación estacional con un máximo característico durante el invierno (Menéndez et al., 2008; Izaguirre et al., 2010). No obstante, los daños sufridos así como el consenso general advierten de cierta singularidad durante el invierno 2013-14. El análisis de los distintos parámetros del estado del mar permite evaluar diferentes propiedades del oleaje que afectan a su impacto sobre la costa. De esta manera se ha evaluado la singularidad con respecto al registro completo desde 1979 de la altura del oleaje, periodo y dirección. Los resultados indican que los valores de H_s , así como los periodos de pico y medio, que se alcanzaron durante el invierno 2013-14 si bien no son los máximos históricos, están entre los cinco valores máximos registrados. Es por ello que se resalta la posible conjunción de máximos de distintas propiedades del oleaje durante ciertos picos de temporal

junto con niveles de marea altos, así como la amplificación del impacto sobre la costa por la sucesión de temporales consecutivos.

La singularidad de los temporales de oleaje ocurridos durante el invierno 2013-14 se muestra en la figura 6, dónde se representan las tasas de ocurrencia anuales de temporales de oleaje ocurridos durante el periodo de Diciembre a Marzo y sus picos máximos de H_s para una localización en aguas abiertas próxima a Santander. La tasa de ocurrencia de temporales durante el invierno 2013-14 solo es superada durante el año 1984, donde llegaron a ocurrir 10 eventos. Por otro lado, la magnitud de los temporales es similar a otros registros máximos ocurridos. No obstante, la combinación de intensidad y frecuencia de temporales durante el invierno de estudio es única durante el periodo de 37 años analizado.

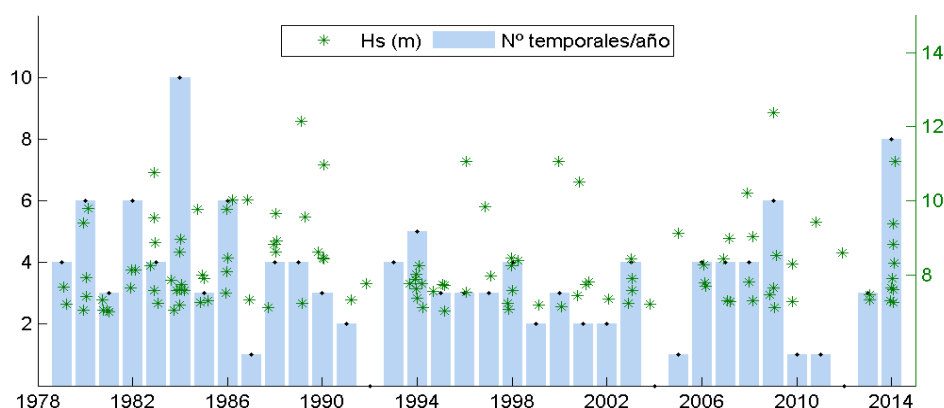


Fig. 6: Número de eventos al año que superan los 7m de H_s durante el invierno (azul) y máximos de H_s asociados (asteriscos verdes). Localización: aguas abiertas de Santander [43.75°N, 3.75°O].

Una vez caracterizadas las condiciones atmosféricas que generaron los temporales, se realiza un análisis de los patrones de circulación atmosférica en el atlántico norte durante el invierno, con el fin de investigar los patrones tipo que dan lugar a temporales. Los patrones de circulación o 'tipos de tiempo' (*weather types*) permiten evaluar la variabilidad climática, representando los patrones preferentes que se producen por la interacción entre distintas escalas temporales y espaciales (desde la planetaria a la regional y en una escala de tiempo más larga que el período típico de transiciones baroclínicas). Es por ello, que esta caracterización de patrones permite filtrar la turbulencia en la circulación del Atlántico norte y facilita el análisis climático.

La caracterización de los 'tipos de tiempo' se ha realizado mediante la técnica no-jerárquica K-means (McQueen, 1967). Esta técnica consiste en dividir una muestra de datos en N grupos a determinar. Posteriormente, se calcula una matriz de similitudes entre los N grupos n y los datos, de forma que cada dato estará representado por su grupo más parecido. Los grupos o tipos de tiempo se representan a través de su centroide y están formados por el conjunto de datos para los que el centroide es el más cercano. En vez de inicializar aleatoriamente la técnica K-means, se utiliza el criterio de máxima disimilitud, de forma que la clasificación de grupos final es estable. La variable utilizada para realizar la clasificación son los campos de presión a escala diaria del reanálisis atmosférico sobre el Atlántico Norte y durante los meses de Diciembre a Marzo. La clasificación se ha realizado sobre el espacio de las funciones empíricas ortogonales que contienen el 95% de la varianza de los campos espacio-temporales de presión a nivel del mar.

Acorde con previos estudios (ej. Cassou, 2008, Hurrell y Dessler, 2010), la clasificación obtenida para $N=4$ grupos está constituida por las dos tipologías de circulación zonal asociadas a la NAO negativa y positiva, y dos grupos que representan intensos sistemas

anticiclónicos, uno sobre el norte de Europa, denominándose 'bloqueo atlántico' y otro sobre la cuenca este del Atlántico Norte, denominándose en este caso 'Atlantic Ridge'. Es importante mencionar que estas 4 tipologías presentan la misma probabilidad de ocurrencia media durante el invierno. Las situaciones de temporal descritas en la sección anterior se agrupan en su mayoría (6/8) como situaciones tipo NAO positiva, mientras que los dos temporales restantes se asocian a los grupos de bloqueo y atlantic-ridge.

Debido a la gran variedad de casuísticas posibles que se engloban dentro de los 4 patrones descritos, se ha realizado una clasificación de 16 tipos de tiempo para caracterizar las situaciones tipo de temporal. En la figura 7 se muestran los 16 tipos de tiempo obtenidos agrupados por afinidad con los 4 modos de variabilidad descritos anteriormente. Los tipos que aparecen enmarcados representan más del 80% de los episodios de temporal ocurridos desde 1979. Los grupos enmarcados con línea discontinua representan las tipologías asociadas a los temporales del invierno 2013-14. Resalta un único tipo asociado al patrón NAO positiva que, junto con otras 2 tipologías asociadas a la situación de bloqueo y dos más asociadas al patrón Ridge constituyen más del 80% de los casos de temporal históricos en los últimos 37 años. Por otro lado, los cuatro tipos asociados al modo ridge o de bloqueo presentan gran variabilidad entre sí.

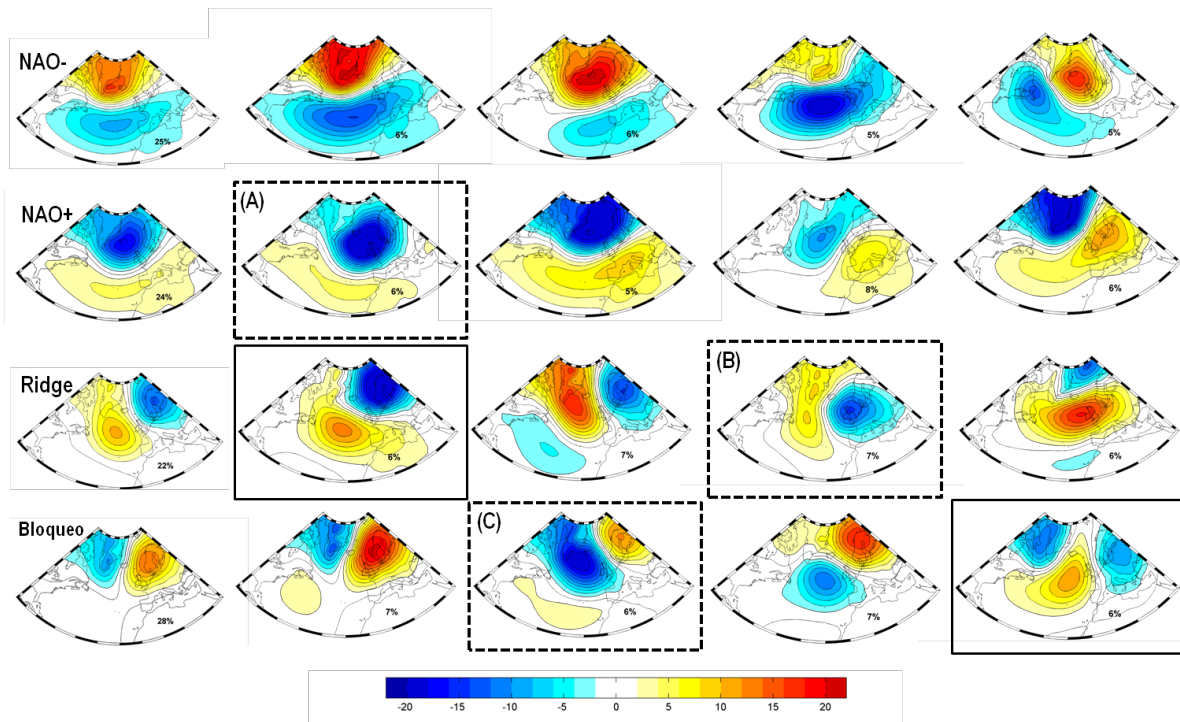


Fig. 7: 16 patrones de circulación de invierno ordenados por similitud a los 4 patrones típicos asociados a las fases positiva y negativa de la NAO, cuña anticiclónica o Atlantic Ridge y sistemas de bloqueo. Las tipologías se han obtenido a partir de los campos de presión a nivel del mar históricos diarios. Se representan las anomalías de presión (mb).

La situación tipo NAO positiva (patrón A, representa el 35% de los temporales históricos) está asociada a los temporales Dirk, Christina, Petra y Ruth. Representa una situación de circulación zonal caracterizada por uno o varios centros de baja presión próximos a Irlanda o Norte de Gran Bretaña mientras que se mantiene el alta subtropical relativamente débil. Propicia fuertes vientos en el este de la cuenca oceánica atlántica, lo que genera intensos swells de componente NO u ONO.

El patrón B (18% de los temporales históricos), asociado al tipo ridge, es una situación caracterizada por una cuña anticiclónica en el centro del atlántico norte y un sistema

depresivo sobre las islas británicas. Los temporales denominados SN1 y SN2 están asociados a este patrón. Esta situación puede generar vientos de componente NO generados relativamente cerca del continente europeo que dan lugar a temporales con mayor componente Norte que los swells generados a mayor distancia, lo que provoca mayor afección a las costas de Cantabria y País Vasco.

El patrón tipo C (9% de los temporales históricos) tiene asociado el temporal Nadja. Representa una situación sinóptica de bloqueo definida por una estructura dipolar compuesta por un sistema anticiclónico sobre el continente europeo y la baja sub-polar. Genera fuertes vientos en latitudes en torno a 55°N de componente ONO que generan oleajes con una clara dirección de propagación ESE hacia la cornisa cantábrica.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un estudio climático sobre los temporales marítimos ocurridos durante el invierno 2013-14. Para ello, se analiza la génesis y desarrollo de los ocho temporales que alcanzaron las costas atlánticas españolas y sus características se comparan respecto a las situaciones de temporal marítimo ocurridas en el pasado. El análisis climatológico requiere una caracterización de estos eventos tipo. Esto se lleva a cabo mediante una reconstrucción histórica del oleaje en todo el océano Atlántico Norte durante los últimos 30 años y un análisis de los patrones de circulación atmosférica que provocan oleajes especialmente intensos.

El reanálisis del oleaje se ha validado con medidas instrumentales procedentes de boyas marinas, demostrando su pericia para simular los temporales marítimos ocurridos. Las técnicas no lineales de clasificación de patrones sinópticos empleadas permiten caracterizar 'tipos de tiempo' asociados a los temporales marítimos que presentan interesantes asimetrías con respecto a los clásicos estados asociados a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO en sus fases positiva y negativa).

La principal conclusión que se deduce de este estudio es que el elemento excepcional de los temporales marítimos durante el invierno 2013-14 no es tanto la magnitud de los máximos de oleaje alcanzados sino el número de eventos extremos consecutivos y la intensidad energética del oleaje durante este periodo.

Los estados climáticos que caracterizan patrones de circulación mete-oceánicos asociados a temporales de oleaje son varios. Acorde con la mayoría de los resultados que la comunidad científica concluye para otras variables climáticas (temperatura, lluvias, nieve, etc.), el patrón dominante que genera eventos de intensidad en el oleaje sobre las costas de Europa es la fase positiva de la NAO durante el invierno, caracterizada por una intensificación de los gradientes de presión entre el dipolo de la baja sub-polar (borrasca islandesa) y la alta sub-tropical (anticiclón de las Azores). Sin embargo, no todas las situaciones de NAO positiva dan lugar a oleajes intensos en la cornisa cantábrica. Este estudio determina la subclase asociada a la fase positiva de la NAO que provoca temporales en nuestras costas así como otras dos tipologías de circulación atmosférica que dan lugar a oleajes muy energéticos y están asociados a los patrones de Bloqueo y Ridge, muy comunes durante el invierno. La sucesión de ciclogénesis explosivas obedece a una situación tipo NAO positiva incentivada por una intensa corriente en chorro. Sin embargo, este patrón atmosférico ha sido el más común durante los últimos 30 años.

Agradecimientos:

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto del plan nacional iMar21 (CTM2010-15009).

6. REFERENCIAS

- Cassou C. (2008). Intraseasonal interaction between the Madden–Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature* 455, 523-527.
- Hurrell, J., C. Dessel (2010). North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Marine Systems*. 79, 231-44.
- Izaguirre, C., F. J. Mendez, M. Menendez, A. Luceño, and I. J. Losada (2010). Extreme wave climate variability in southern Europe using satellite data, *J. Geophys. Res.*, 115, C04009.
- Izaguirre, C., F. J. Mendez, M. Menendez, I. J. Losada (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data. *Geophysical Research Letters*. vol. 38, L10607.
- McQueen, J.B. (1967). Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. *Statistics and Probability*, University of California Press, 281-297.
- Menendez, M., F. J. Mendez, C. Izaguirre, A. Luceño, and I. J. Losada (2009). The influence of seasonality on estimating return values of significant wave height. *Coastal Eng.*, 56(3), 211–219.
- Saha, S. et al. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 91(8), 1015–1057.
- Tolman, H. and the WAVEWATCH III Development Group. (2014). User manual and system documentation of WAVEWATCH III R° version 4.18. Technical Note. Marine Modeling and Analysis Branch of the Environmental Modeling Center. NCEP - NOAA. Maryland, USA.